



Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I

# LCTP

## Laboratório de Controle de Temperatura Portátil

Tucuruí – Pará  
2024



Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I

Carlos Soares Costa Junior – 202233940020

Jessica da Silva Sousa - 202233940008

# LCTP

## Laboratório de Controle de Temperatura Portátil

Tucuruí – Pará  
2024



Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I

## 1. INTRODUÇÃO

O propósito deste trabalho é explorar e aplicar conceitos de controle de temperatura em um sistema experimental, utilizando técnicas de controle proporcional e integral (PI) para manter a estabilidade e precisão no valor desejado de temperatura. O projeto visa desenvolver um sistema que possa ajustar a temperatura de um aquecedor automaticamente, reagindo às variações em tempo real e garantindo que o sistema não ultrapasse ou desvie significativamente da meta pré-estabelecida. Esse tipo de controle é essencial em aplicações industriais onde a precisão e a estabilidade térmica impactam diretamente a qualidade, segurança e eficiência dos processos.

A importância do controle de temperatura em sistemas industriais é notável em setores como químico, farmacêutico, alimentício e de eletrônica, onde muitos processos dependem de condições térmicas precisas. Manter a temperatura dentro de uma faixa específica evita desperdícios, danos a equipamentos e produtos, além de garantir que o sistema opere de maneira econômica. Em reatores químicos, por exemplo, uma temperatura fora do controle pode gerar reações indesejadas, afetando tanto o rendimento quanto a segurança do processo.

O sistema desenvolvido para este estudo consiste em um protótipo de controle de temperatura baseado em Arduino e Python. Utilizando um transistor como aquecedor e um sensor de temperatura, o sistema coleta dados em tempo real e, via comunicação serial com Python, aplica ajustes no sinal PWM que regula o aquecimento, buscando a estabilização na temperatura desejada. As técnicas empregadas para definir valores precisos dos parâmetros do controlador PI foram desenvolvidas a partir de uma modelagem detalhada, com base em testes que incluíram a aplicação de um sinal degrau ao sistema. Esses testes permitiram observar a resposta do sistema e ajustá-lo para uma resposta mais eficiente, garantindo que a temperatura atinja a meta com o mínimo de oscilação e tempo de acomodação. O uso do Arduino permite o gerenciamento direto do circuito de controle, enquanto o Python é responsável pelos cálculos e pela visualização gráfica do comportamento do sistema. Essa estrutura possibilita uma análise prática de sistemas de controle e facilita o entendimento dos desafios e das soluções aplicadas ao controle de temperatura.

## 2. PROJETO FÍSICO DO SISTEMA

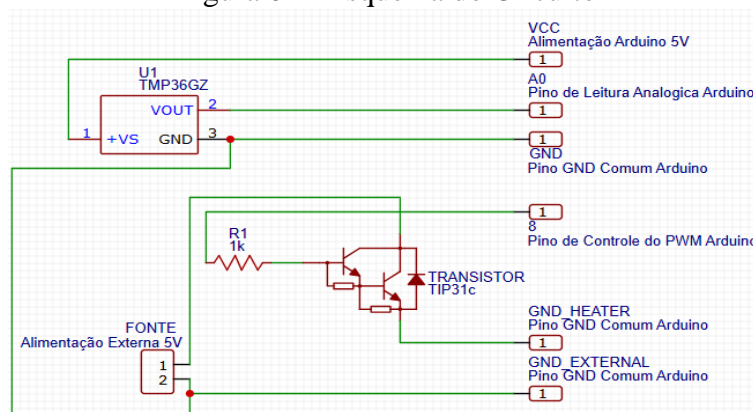
O sistema de controle de temperatura desenvolvido utiliza um circuito básico que combina componentes físicos e eletrônicos, onde o próprio transistor TIP31C atua como elemento de aquecimento. Esse sistema inclui um sensor de temperatura TMP36GZ, um transistor TIP31C conectado ao pino PWM do Arduino Mega 2560 através de um resistor de 1 k $\Omega$ , e uma fonte de alimentação de 5V. Cada componente foi escolhido por suas características de resposta, precisão e capacidade de integração com o Arduino e o software em Python, que auxiliam no controle e monitoramento da temperatura.



Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I

- **Arduino Mega 2560:** O Arduino Mega 2560 é o núcleo controlador do sistema. Ele monitora as leituras do sensor TMP36GZ, ajusta o sinal PWM enviado ao transistor TIP31C, e, assim, controla o nível de aquecimento de maneira precisa. A comunicação serial com Python facilita o cálculo dos valores PI para o controle, enquanto o Arduino executa o controle em tempo real, gerando gráficos que monitoram o desempenho do sistema.
- **Sensor de Temperatura TMP36GZ:** O TMP36GZ é um sensor de temperatura linear, com saída de tensão proporcional à temperatura ambiente. Ele é conectado ao pino analógico do Arduino e envia leituras contínuas, possibilitando o ajuste da temperatura do transistor aquecedor com alta precisão.
- **Transistor TIP31C (como aquecedor):** O TIP31C funciona tanto como o elemento de controle quanto como o próprio aquecedor no sistema. Ele é conectado ao pino PWM do Arduino via um resistor de 1 k $\Omega$ , e a temperatura que o transistor atinge é controlada variando o sinal PWM. Ao ajustar a largura de pulso do PWM, é possível regular a corrente que passa pelo transistor, gerando calor que depende da tensão aplicada, neste caso de uma fonte de 5V. Dessa forma, o transistor não apenas conduz corrente, mas também atua como o dispositivo de aquecimento principal.

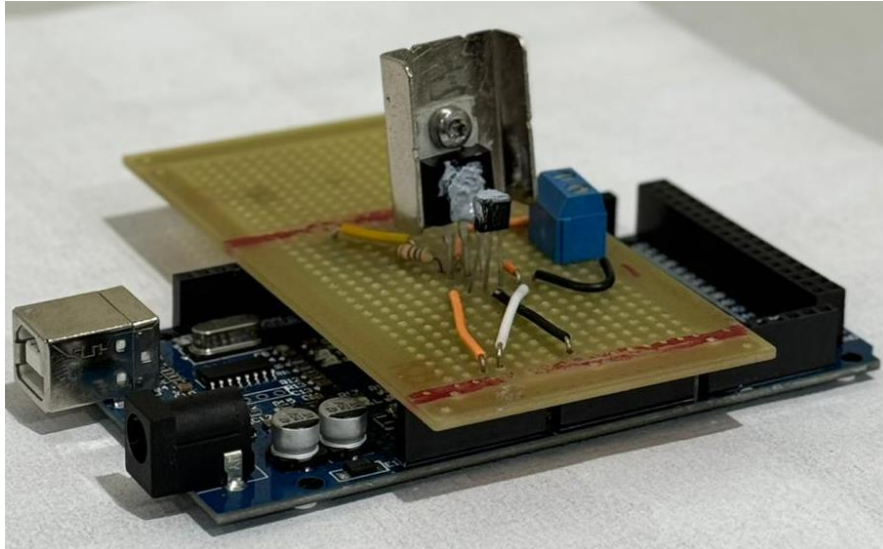
Figura 01 - Esquema do Circuito



Fonte: Autoral

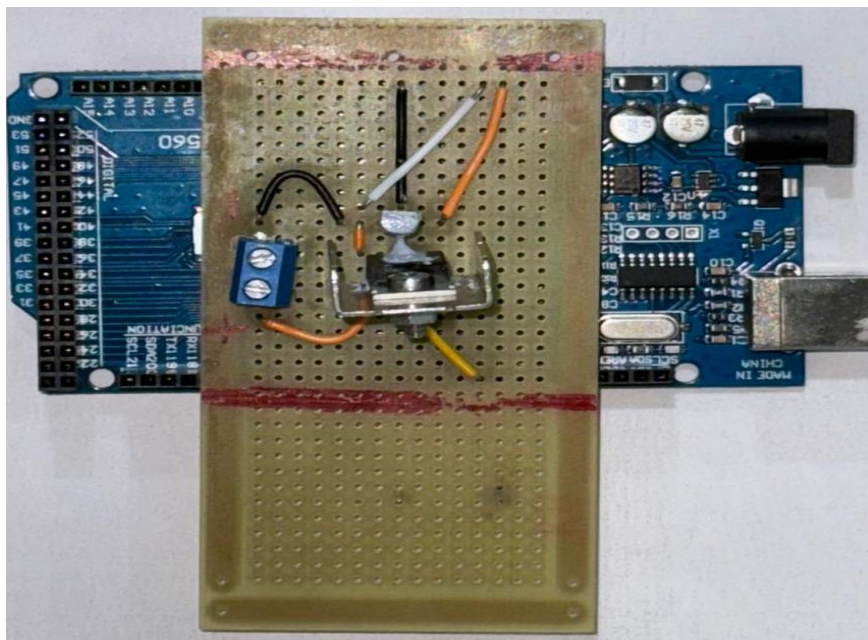


Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I  
Figura 02 – Protótipo Físico



Fonte: Autoral

Figura 03 – Protótipo Físico



Fonte: Autoral



Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I

No circuito, o TMP36GZ é conectado a um dos pinos analógicos do Arduino para a leitura da temperatura ambiente, e o transistor TIP31C está conectado ao pino PWM via o resistor de 1 kΩ, o que controla a corrente de aquecimento. O sistema é alimentado por duas fontes de 5V, uma dela diretamente do arduino que alimenta o sensor de temperatura, e a outra é uma fonte externa que alimenta o transistor aquecedor.

## A. CARACTERÍSTICAS DOS ELEMENTOS

1. **TMP36GZ:** O TMP36GZ fornece uma saída analógica de tensão proporcional à temperatura, com uma sensibilidade de 10 mV/°C e um ponto de referência de 0,5V para 0°C. A leitura da tensão do TMP36GZ pelo Arduino pode ser convertida para temperatura em graus Celsius utilizando a seguinte fórmula:

- Primeiramente, o Arduino lê um valor analógico (de 0 a 1023) que representa a tensão. Esta leitura pode ser convertida para volts:

$$V_{sensor} = \frac{Leitura\ Analógica * 5}{1023} \quad (1)$$

- A partir dessa tensão, a temperatura em graus Celsius  $T(^{\circ}C)$  é calculada da seguinte forma:

$$(T^{\circ}C) = (V_{sensor} - 0.5) * 100 \quad (2)$$

onde:

- $V_{sensor}$  é a tensão de saída do sensor TMP36GZ.
  - Subtrai-se 0,5V para alinhar o valor de referência de 0°C.
  - Multiplica-se por 100 para converter a diferença de tensão em graus Celsius, já que o TMP36GZ possui uma sensibilidade de 10 mV/°C.
2. **TIP31C (como aquecedor):** No sistema, o TIP31C funciona diretamente como o aquecedor. Conectado ao pino PWM do Arduino via o resistor de 1 kΩ, ele aquece em resposta à variação do PWM. A corrente e, consequentemente, a temperatura do transistor são ajustadas de acordo com a variação de tensão da fonte de 5V. Assim, o TIP31C opera não apenas como um controlador de corrente, mas como o elemento que gera calor, permitindo um controle de temperatura diretamente proporcional ao sinal de controle PWM. o sistema faz uso de duas conversões importantes: a primeira é a relação entre a tensão de controle de 5V e o sinal PWM



Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I

enviado ao transistor TIP31C, e a segunda é a conversão da leitura analógica do sensor de temperatura TMP36GZ para valores de temperatura em graus Celsius.

- **Conversão de Tensão (5V) para PWM**

O sinal PWM é ajustado de forma proporcional à tensão de 5V aplicada ao transistor TIP31C. O valor de PWM é uma representação digital do ciclo de trabalho, com 0% representando 0V e 100% representando 5V. A relação entre a tensão VVV e o sinal PWM pode ser representada pela seguinte equação:

$$PWM = \frac{255}{Tm} * Td \quad (3)$$

onde:

- $Td$  é a tensão desejada (de 0 a 5 volts) que é definida via computador.
- $Tm$  é a tensão máxima que a fonte pode chegar, que nesse caso é uma alimentação externa de 5V.
- O valor máximo do PWM é 255 (para um ciclo de trabalho de 100%).

Esses componentes integrados permitem ao sistema controlar a temperatura de maneira eficaz, com o Arduino regulando o aquecimento do transistor TIP31C conforme necessário para alcançar e manter a temperatura de referência.

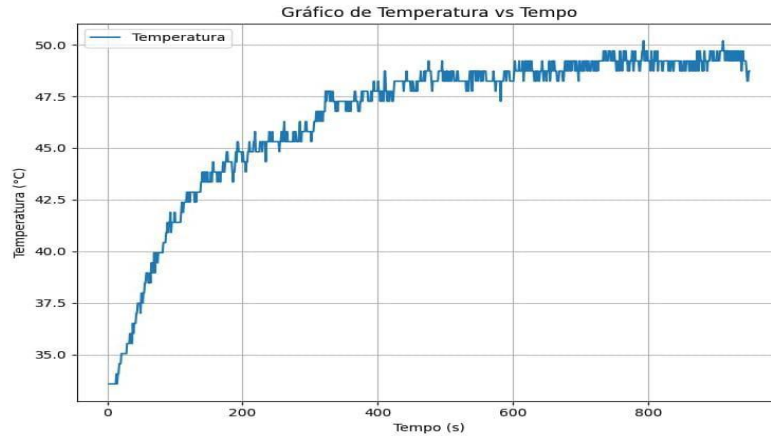
### 3. Modelagem do Sistema

Para determinar o comportamento do sistema, inicialmente desconhecido, aplicou-se um degrau com 50% da potência de modulação por largura de pulso (PWM). O objetivo foi observar a variação de temperatura em função do tempo, obtendo-se o resultado apresentado abaixo.



Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I

Figura 04 – Resposta experimental ao degrau.



Fonte :Autorial.

Com base nos dados obtidos, concluiu-se que o sistema possui comportamento típico de um sistema de primeira ordem, sem zeros. Para especificar o desempenho desse sistema, considera-se a função de transferência,

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (4)$$

Onde:

- K é o ganho do sistema.
- $\tau$  é a constante de tempo.

#### Determinação da Constante de Tempo ( $\tau$ )

Analisando o gráfico, observou-se um tempo de assentamento aproximado de 900 segundos. Esse valor pode ser representado como,

$$t_s = 4 * \tau \quad (5)$$

Portanto,

$$\tau = \frac{t_s}{4} = \frac{900}{4} = 225s$$

#### Cálculo do Ganho do Sistema (K)

Para determinar o ganho do sistema, analisou-se a resposta em regime permanente. Aplicando uma entrada constante de 2,5 volts, o sistema se estabilizou com uma saída de 15 °C acima da temperatura ambiente. O ganho do sistema, é definido pela relação entre a saída e a entrada, indicada na equação abaixo,





Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I

$$K = \frac{y(\infty)}{u(\infty)} = \frac{15}{2,5} = 6 \text{ } ^\circ\text{C/V} \quad (6)$$

Assim, considerando o ganho calculado, obtém-se a função de transferência em malha direta do sistema, apresentada a seguir,

$$G(s) = \frac{6}{225s + 1} \quad (7)$$

### Projeto do Controlador

Com a caracterização do sistema, foi possível definir os requisitos para o controlador. Os objetivos de desempenho especificados foram:

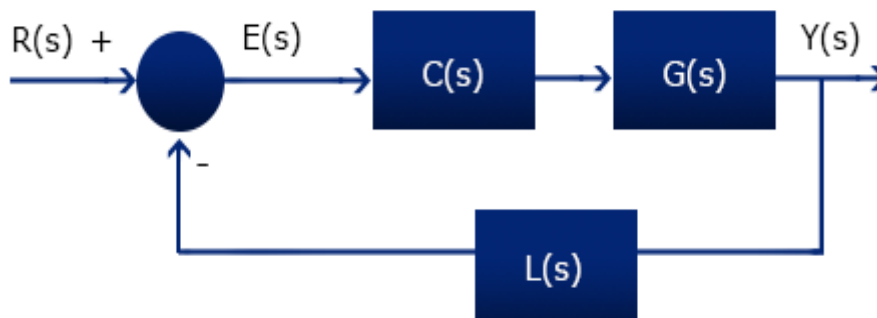
- Erro nulo em regime permanente, garantindo assim ganho unitário
- $t_s = 400s$ .

O controlador proporcional-integral (PI) foi selecionado como a melhor opção para atender a esses requisitos de desempenho no controle de temperatura por possuir uma resposta rápida e estável, tornando-o ideal para o controle preciso de temperatura, que é representado por,

$$C(s) = \frac{Kc(s + a)}{s} \quad (8)$$

### Função de transferência em malha fechada.

Figura 05 – Diagrama de Blocos.



Fonte: Google.com



Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I

Para determinar o comportamento do sistema em malha fechada, desenvolvemos a função de transferência considerando que o sistema possui realimentação unitária. A função de transferência de malha fechada é dada por:

$$H(s) = \frac{C(s) * G(s)}{1 + C(s) * G(s)} \quad (9)$$

Aplicando a equação (7) e (8) em (9), temos,

$$H(s) = \frac{\frac{Kc(s+a)}{s} * \frac{K}{\tau s + 1}}{1 + \frac{Kc(s+a)}{s} * \frac{K}{\tau s + 1}} \quad (10)$$

$$H(s) = \frac{K * Kc(s+a)}{\tau s^2 + s + KK_c s + KK_c a} \quad (11)$$

Para tornar essa expressão compatível com uma dinâmica de segunda ordem, manipula-se a mesma para função de transferência de segunda ordem que apresenta um ganho em malha fechada ( $K_2$ ) unitário. Assim, a função de transferência em segunda ordem é dada por:

$$T(s) = \frac{K_2 \omega n^2}{s^2 + s + 2\zeta \omega n s + \omega n^2} \rightarrow H(s) = \frac{\frac{K * K_c(s+a)}{\tau}}{s^2 + \frac{(1 + KK_c)}{\tau} s + \frac{KK_c a}{\tau}} \quad (12)$$

Igualando os coeficientes, obtemos as relações para o projeto dos parâmetros do controlador proporcional-integral (PI). Essas relações são descritas pelas equações:

$$\frac{(1 + KK_c)}{\tau} = 2\zeta \omega n \rightarrow K_c = \frac{2\zeta \omega n * \tau - 1}{K} \quad (13)$$

$$\frac{KK_c a}{\tau} = \omega n^2 \rightarrow a = \frac{\omega n^2 * \tau}{KK_c} \quad (14)$$

Para se obter uma resposta mais rápida utiliza-se o sistema subamortecido, onde  $0 < \zeta < 1$ , o escolhido foi 0,707. Pode-se definir  $\omega n$  pelos requisitos do sistema,



Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I

$$\omega_n = \frac{4}{t_s * \zeta} = 0,014 \quad (15)$$

Correlacionando as formas de representação de controlador PI , temos que:

$$C(s) = \frac{Kc(s + a)}{s} = \frac{K_P(s + \frac{K_i}{K_P})}{s} \quad (16)$$

Portanto,

$$Kc = K_P = 0,5$$

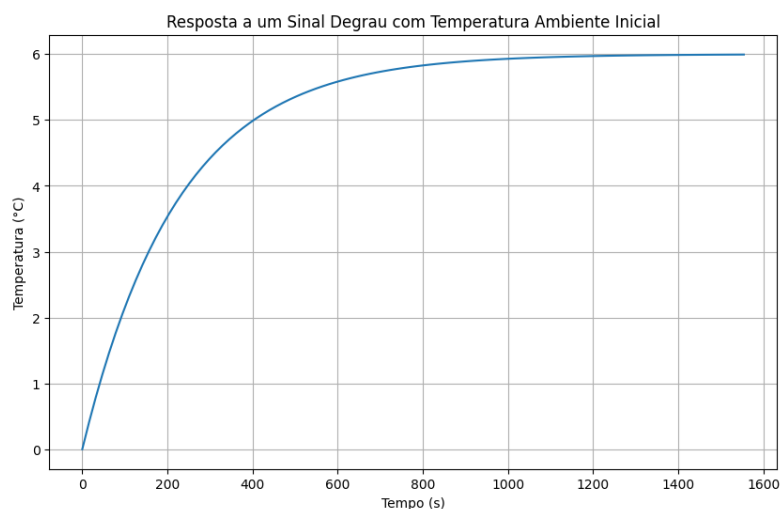
$$a = \frac{K_i}{K_P} \rightarrow K_i = K_P * a = 0,006 \quad (17)$$

## 4. RESPOSTA A UM DEGRAU

### Simulação da Resposta a um Degrau em Malha Aberta

A simulação da resposta a um degrau do sistema de aquecimento foi realizada em malha aberta, onde não há controle de realimentação para ajustar a temperatura em função da entrada. Na Figura abaixo, a curva representada pela linha tracejada azul ilustra a resposta teórica do sistema ao degrau de entrada. Observa-se um crescimento exponencial típico de sistemas de primeira ordem, no qual a temperatura aumenta gradualmente até atingir um valor de equilíbrio (estado estacionário).

Figura 06 – Resposta simulada ao degrau.



Fonte: Autoral

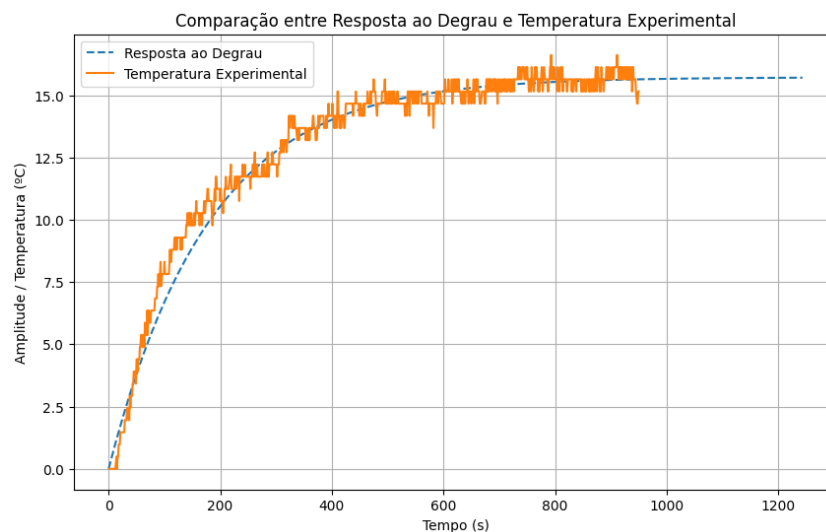


Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I

Esse comportamento simulado corresponde a um sistema de aquecimento ideal, sem considerar atrasos ou limitações físicas do hardware. O modelo simulado permite prever a resposta teórica do sistema à entrada de um sinal de degrau, proporcionando uma referência para comparar com os resultados experimentais.

### Comparação entre Resultados Experimentais e Simulados]

Figura 07 – Comparação de respostas Simuladas x Experimentais



Fonte: Autoral

Na figura acima, a linha laranja representa a resposta experimental do sistema de aquecimento submetido ao mesmo degrau de entrada. A comparação entre a resposta simulada e a experimental revela algumas discrepâncias, que são discutidas a seguir.

Primeiramente, observa-se que o sistema experimental apresenta um **atraso inicial** (deadtime) de aproximadamente 20 segundos, durante o qual a temperatura demora a reagir ao sinal de entrada. Esse comportamento ocorre devido à inércia térmica do sistema, que não foi considerado na modelagem teórica. Para simplificação da simulação, o deadtime foi desconsiderado, o que causa uma diferença inicial entre as curvas.

Além disso, a resposta experimental mostra **oscilações** em torno do valor de equilíbrio, as quais não estão presentes na simulação teórica. Essas oscilações podem ser atribuídas a fatores como limitações no controle de precisão do hardware e interferências externas, que introduzem pequenas variações na leitura da temperatura. Outra possível causa para a discrepância é o **atraso na resposta térmica** do aquecedor e dos sensores, que afeta a precisão da leitura instantânea de temperatura em sistemas experimentais.

A análise da resposta ao degrau é fundamental para a caracterização do sistema, pois permite determinar parâmetros essenciais para seu entendimento e controle. A partir da



Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I

resposta ao degrau, foi possível definir o **ganho do sistema K**, calculado pela razão entre a variação da saída e a variação do sinal de entrada aplicada.

$$K = \frac{15\text{ }^{\circ}\text{C}}{2.5\text{ V}} \quad (18)$$

$$K = 6$$

Neste caso, o ganho **K** foi obtido como 6. Esse valor representa a relação direta entre o aumento da temperatura e a intensidade do sinal aplicado ao sistema.

Além disso, a resposta ao degrau permitiu identificar a **constante de tempo  $\tau$**  do sistema, que é um parâmetro fundamental para entender a velocidade de resposta. Com base na curva simulada e experimental, o valor de  **$\tau$**  foi estimado em **225 segundos**. Esse parâmetro indica o tempo necessário para o sistema atingir aproximadamente 63% do valor final, sendo uma medida de quão rápido o sistema responde a uma mudança no sinal de entrada.

Em conclusão, a resposta ao degrau foi essencial para definir parâmetros fundamentais do sistema, como o ganho **K** e a constante de tempo  **$\tau$** , possibilitando uma modelagem inicial que, embora apresente diferenças em relação ao comportamento experimental, fornece uma representação consistente da dinâmica do sistema. As discrepâncias observadas, como o deadtime e as oscilações experimentais, destacam as limitações práticas do sistema e oferecem direcionamento para futuras melhorias na modelagem.

## 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO CONTROLADOR PI

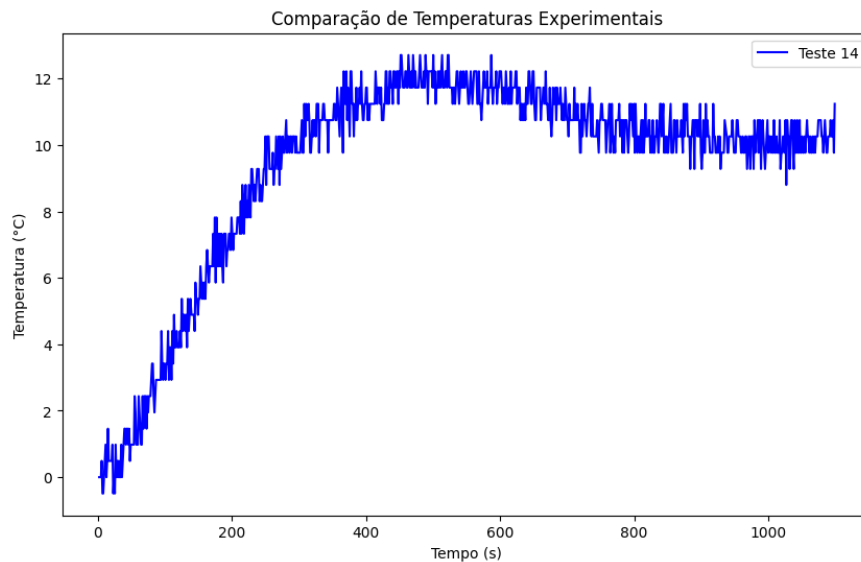
Os resultados obtidos com a aplicação do controlador PI em três diferentes configurações evidenciam, de forma detalhada, as características de resposta do sistema de controle de temperatura. O principal objetivo de cada experimento foi atingir e manter uma temperatura estável em torno de 40 °C, minimizando os efeitos da temperatura ambiente nos gráficos e considerando apenas o aquecimento proporcionado pelo sistema. Essa análise oferece informações valiosas sobre como diferentes parâmetros de controle influenciam o desempenho do sistema em relação a tempo de subida, instante de pico, ultrapassagem e tempo de acomodação.



Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I

## Experimento 1 (Curva Azul) – Teste 14

Figura 08 – Resposta ao controlador PI (Teste 14)



Fonte: Autoral

### Parâmetros Utilizados:

- $K=0.22$  (°C/PWM)
- $K_p=2.70$
- $K_i=0.05$
- Tempo de Estabilização ( $T_s$ ) = 700 s
- Fator de Amortecimento ( $\zeta$ ) = 0.707

### Características da Resposta:

Neste primeiro teste, o sistema foi manipulado através de um controle aplicado sobre *Pulse Width Modulation*, PWM, ou Modulação por Largura de Pulso de maneira de maneira que o controle projetado no aquecedor ficasse variando entre 0 a 255 bits de informação. O valor de tensão era convertido de maneira que o sinal pudesse ser definido via computador e repassado diretamente ao arduino para leitura, com isso o sistema apresentou uma resposta subamortecida, caracterizada por oscilações consideráveis e uma resposta moderadamente lenta. O valor relativamente elevado de  $K_p$  resultou em uma elevação inicial agressiva da temperatura, enquanto o  $K_i$  moderado contribuiu para um tempo prolongado de estabilização. Observou-se uma ultrapassagem de aproximadamente 8%, com a temperatura alcançando um máximo de 13 °C acima da temperatura ambiente. O instante de pico ocorreu em torno de 500 segundos, e o sistema levou cerca de 800 segundos para atingir a estabilidade, acomodando-se próximo a 12 °C com pequenas oscilações residuais.



Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I

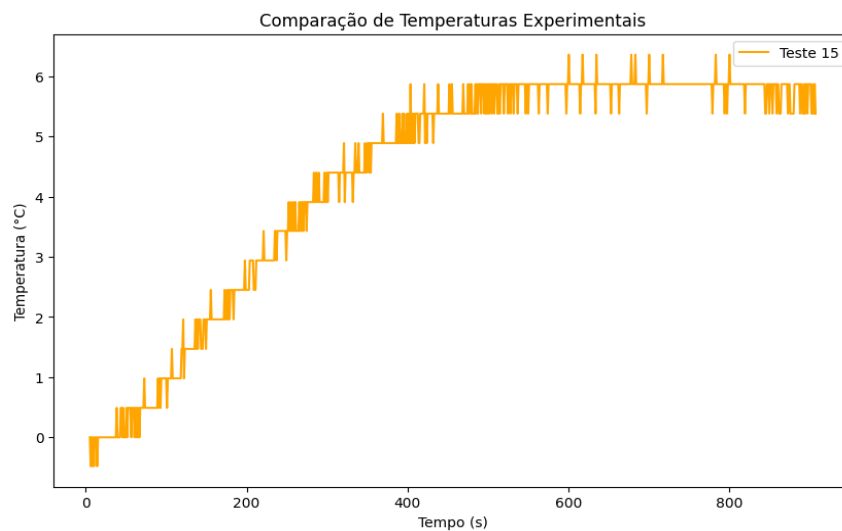
Este teste sugere que a configuração utilizada proporciona um controle mais amortecido, onde a estabilização é alcançada de forma suave, embora com um tempo de resposta relativamente longo. Essa abordagem pode ser adequada para aplicações que não exigem rapidez, priorizando a minimização das oscilações.

**Valores Obtidos:**

- Tempo de subida: 250 s
- Instante de pico: 500 s
- Ultrapassagem percentual: 8%
- Tempo de acomodação: 800 s

## Experimento 2 (Curva Amarela) – Teste 15

Figura 09 – Resposta ao controlador PI (Teste 15)



Fonte: Autoral.

**Parâmetros Utilizados:**

- $K=6$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{V}$ )
- $K_p=0.5$
- $K_i=0.006$
- Tempo de Estabilização ( $T_s$ ) = 400 s
- Fator de Amortecimento ( $\zeta$ ) = 0.707



Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I

### Características da Resposta:

O segundo teste, diferente do primeiro foi manipulado utilizando o valor da tensão aplicada, diferente do anterior que usava PWM para sua modelagem matemática, variando entre 0 e 255, este utilizou uma variação dentro da faixa de valores da tensão possível, que ia de 0 a 5V. Com isso o sistema revelou uma resposta superamortecida, com o sistema alcançando gradualmente a temperatura alvo, sem ultrapassagens. Com valores reduzidos de  $K_p$  e  $K_i$ , o sistema apresentou uma resposta estável, acomodando-se diretamente ao valor final, o que reflete em uma resposta superamortecida, porém bastante lenta. O tempo de acomodação foi de aproximadamente 600 segundos, estabilizando a temperatura em torno de 10 °C.

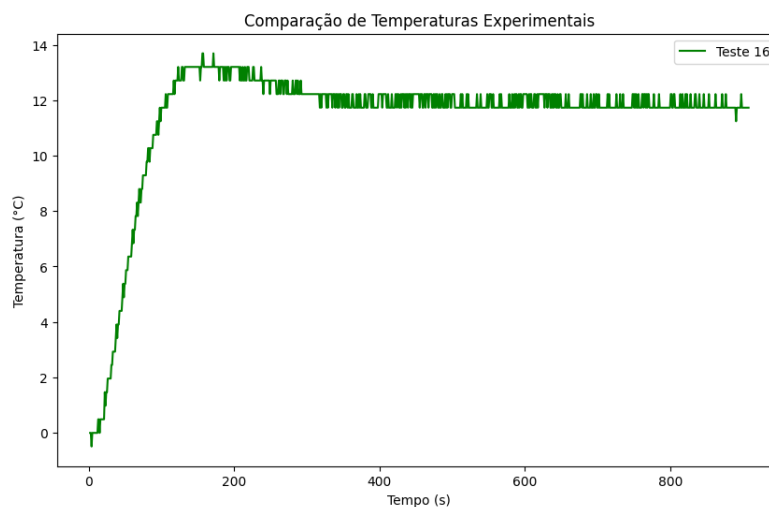
Essa configuração demonstra que a resposta do sistema é segura e estável, sendo ideal para aplicações onde a precisão e suavidade são mais importantes do que a rapidez na resposta. Entretanto, os parâmetros de controle poderiam ser ajustados para acelerar a resposta, caso o tempo de estabilização seja um fator crítico.

### Valores Obtidos:

- Tempo de subida: 400 s
- Instante de pico: Não apresenta pico significativo
- Ultrapassagem percentual: 0%
- Tempo de acomodação: 600 s

## Experimento 3 (Curva Verde) – Teste 16

Figura 10 – Resposta ao controlador PI (Teste 16)



Fonte: Autoral





Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I

**Parâmetros Utilizados:**

- $K=6$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{V}$ )
- $K_p=0.583$
- $K_i=0.0046$
- Tempo de Estabilização ( $T_s$ ) = 400 s
- Fator de Amortecimento ( $\zeta$ ) = 0.9

**Características da Resposta:**

No terceiro teste, a modelagem feita foi semelhante à primeira, baseada na tensão que estava sendo aplicada. A diferença dessa experimentação está na manipulação matemática dos valores, onde ocorreu uma manipulação, onde os ganhos  $K_p$  e  $K_i$  foram multiplicados por uma constante, que permitiu que os valores deles fossem aumentados de maneira que respondessem mais rapidamente e com mais intensidade no sistema, isso permitiu um aquecimento mais rápido e uma estabilização mais direta. Com isso, os valores de  $K_p$  e  $K_i$  foram ajustados para obter uma resposta mais rápida e intensa. Desse modo, o sistema demonstrou uma resposta subamortecida com uma elevação inicial rápida e uma pequena ultrapassagem de aproximadamente 12%, estabilizando-se em torno de 12  $^{\circ}\text{C}$ . O tempo de subida foi de cerca de 100 segundos, atingindo o valor alvo em torno de 300 segundos.

Este teste destaca-se pela resposta mais rápida entre as configurações, sendo útil em aplicações que requerem agilidade no controle da temperatura, mesmo que isso resulte em alguma ultrapassagem. O fator de amortecimento mais alto ( $\zeta=0.9$ ) foi essencial para limitar oscilações excessivas, oferecendo um bom equilíbrio entre rapidez e estabilidade.

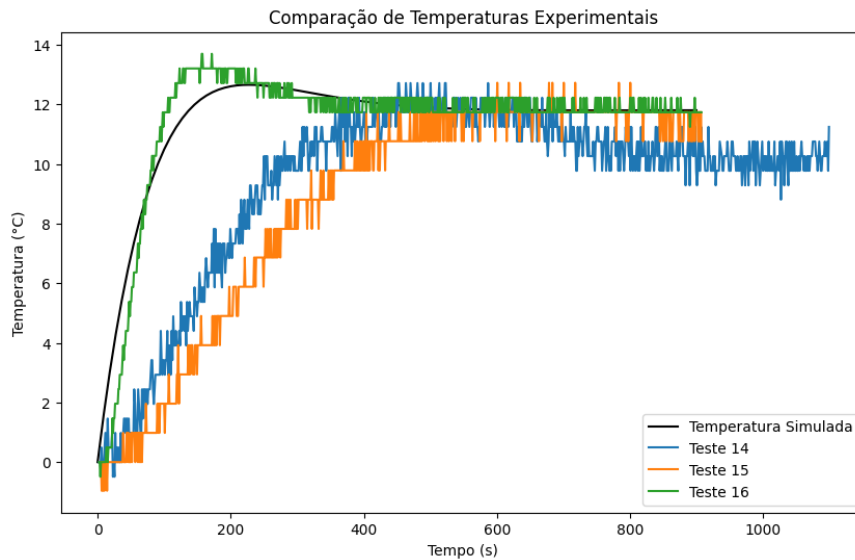
**Valores Obtidos:**

- Tempo de subida: 100 s
- Instante de pico: 150 s
- Ultrapassagem percentual: 12%
- Tempo de acomodação: 300 s



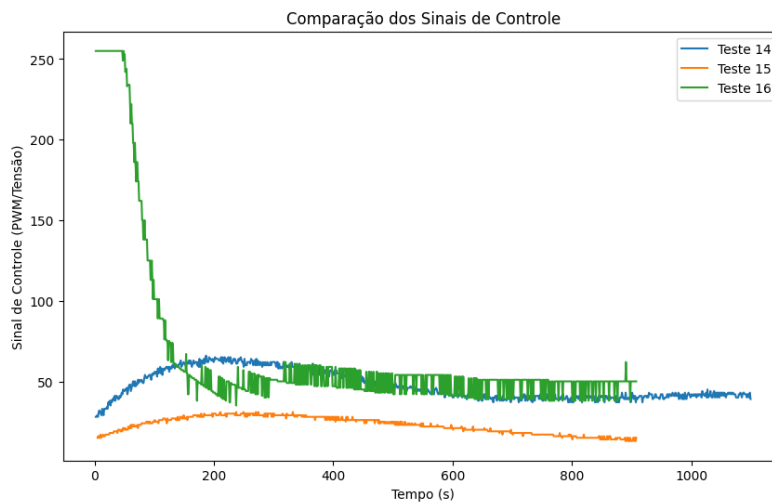
Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I

Figura 11 – Comparação de Respostas x Simulado



Fonte: Autoral

Figura 12 – Comparação dos sinais de entrada do Controlador PI



Fonte: Autoral

A análise comparativa dos testes revela como diferentes combinações de  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $T_s$  e  $\zeta$  impactam diretamente a resposta do sistema de controle de temperatura, oferecendo



Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I

diferentes balanços entre estabilidade e velocidade de resposta. Cada configuração atende a demandas específicas de desempenho:

- **Teste 14 (Curva Azul):** Controle mais estável, porém lento, adequado para sistemas onde a suavidade é priorizada.
- **Teste 15 (Curva Amarela):** Resposta extremamente estável e sem ultrapassagem, ideal para aplicações que exigem precisão sem pressa.
- **Teste 16 (Curva Verde):** Resposta rápida, com maior ultrapassagem, adequado para aplicações que exigem um sistema responsivo.

Essas observações enfatizam a importância de ajustar os parâmetros de controle conforme a aplicação, utilizando o controlador PI para modular a velocidade e a estabilidade da resposta. Além disso, pode-se analisar que a resposta que mais chegou perto dos valores obtidos matematicamente foi o teste 16 (Curva Verde), que com seus valores de  $K_p$  e  $K_i$  resultaram em uma resposta subamortecida quase que ideal quando comparada com o valor simulado matematicamente. Em experimentos futuros, pode ser vantajoso implementar técnicas de otimização para reduzir o tempo de ajuste manual e aprimorar a eficácia do sistema, garantindo respostas ideais com base nos requisitos da aplicação.

## 6. LGR (Lugar das Raízes)

### • Experimento I

Para construção no LGR precisamos da função de transferência em malha aberta do sistema, apresentado abaixo:

$$G(s) = \frac{Kc(s+a)}{s} * \frac{K}{\tau s + 1} \quad (18)$$

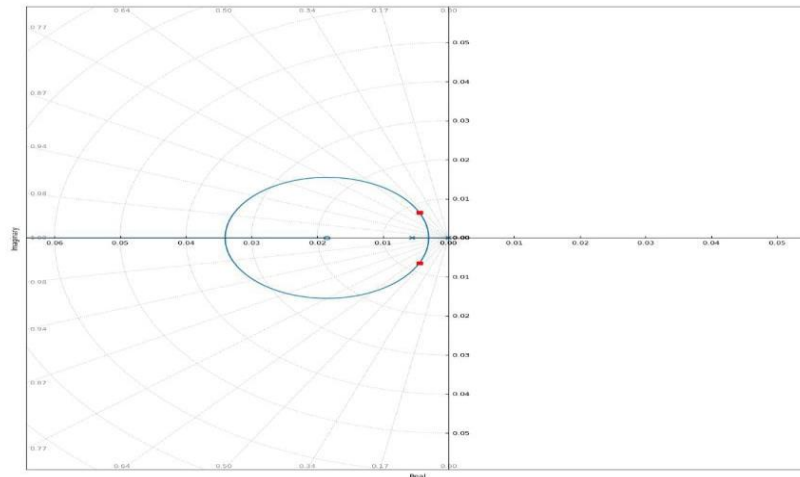
Com base nos parâmetros obtidos deste determinado experimento, temos que:

- **Polos:**  $-0,0044 \pm j 0,0064$
- **Zeros:** 0,135

Essa localização indica que o sistema é estável, pois todos os polos estão localizados no semiplano esquerdo ( $Re(s) < 0$ ). Portanto a representação do LGR do sistema se comporta da seguinte forma,



Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I  
Figura 13 - LGR Experimento I

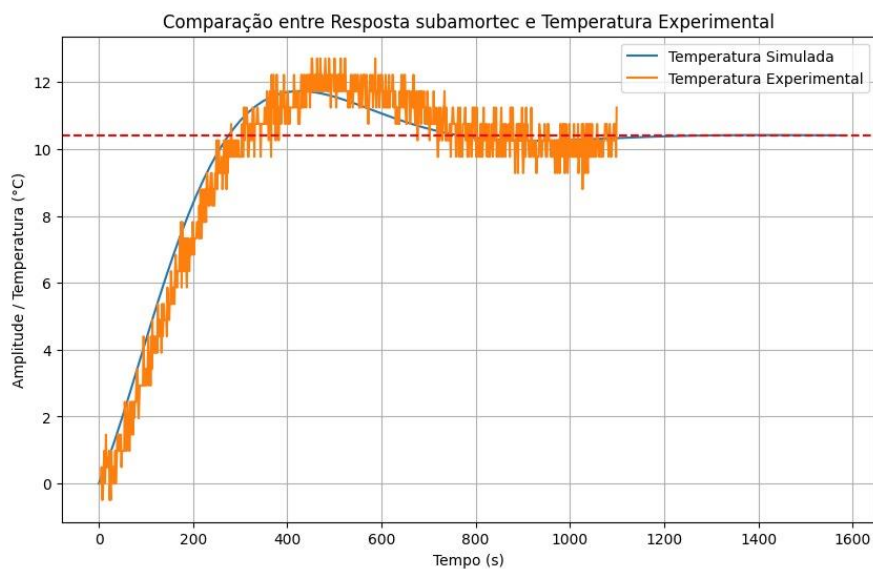


Fonte: Autoral.

Os pontos em vermelho nos gráficos representam a posição dos polos em malha fechada, que definem o tipo de sistema. Neste caso, como os polos são complexos, o sistema é classificado como subamortecido é fundamental saber que o ganho do controlador que movimenta a posição desses polos.

Para verificar a eficiência do controlador na pratica, comparou-se a resposta experimental a simulada apresentada abaixo:

Figura 14 – Comparação entre resposta subamortecida Simulada x Experimental.



Fonte: Autoral.



Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I

O resultado confirma que o controlador funcionou de forma coerente, a ponto de ser mínima as variações dos resultados simulados.

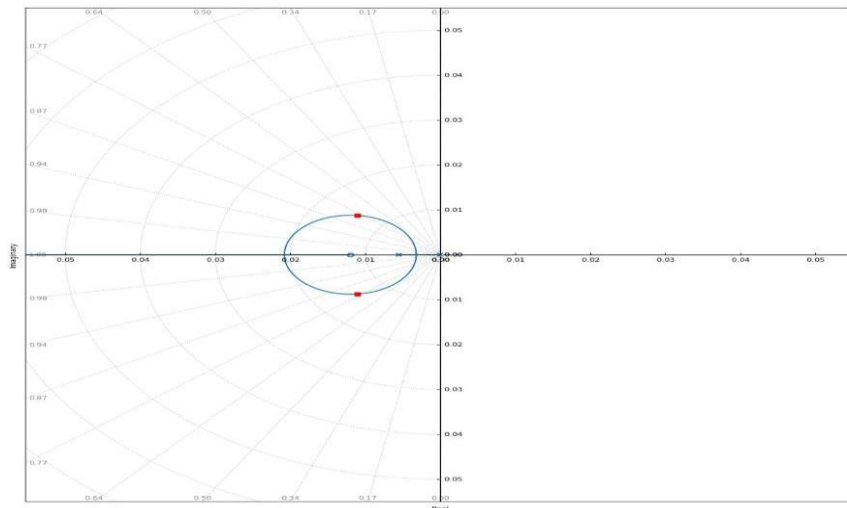
- **Experimento II**

Com base nos parâmetros obtidos deste determinado experimento, temos que:

- **Polos:**  $-0,0111 \pm j 0,0008$
- **Zeros:** 0,012

Essa localização indica que o sistema é estável, pois todos os polos estão localizados no semiplano esquerdo ( $Re(s) < 0$ ). Portanto a representação do LGR do sistema se comporta da seguinte forma,

Figura 15 -LGR Experimento II



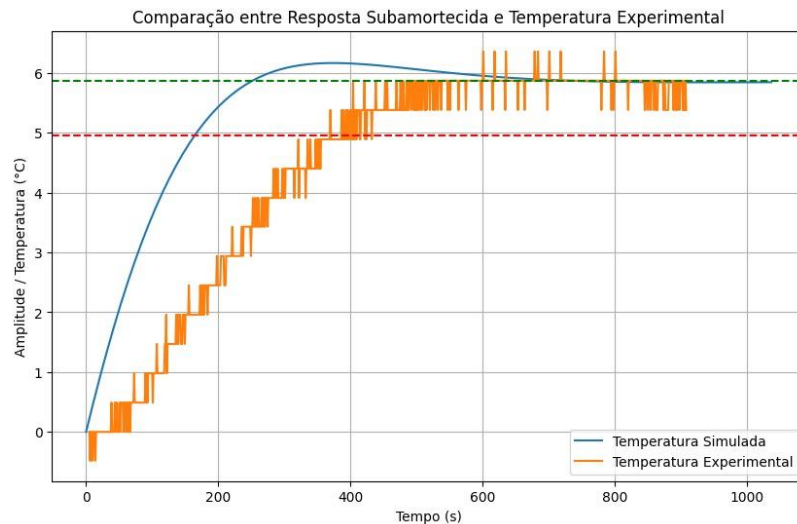
Fonte: Autoral.

O LGR demonstra que o presente sistema é um sistema subamortecido diante da posição dos polos. Para verificar a eficiência do controlador na prática, comparou-se a resposta experimental a simulada apresentada abaixo.



Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I

Figura 16 - Comparação entre resposta subamortecida Simulada x Experimental.



Fonte: Autoral.

A resposta experimental apresentou o comportamento de um tipo de resposta totalmente diferente da simulada, o que diz que o sistema de controlador não está funcionando como deveria.

- **Experimento III**

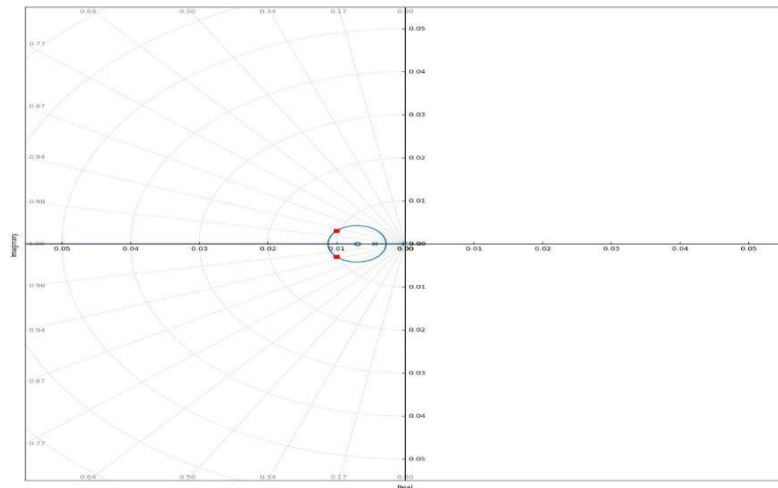
Com base nos parâmetros obtidos deste determinado experimento, temos que:

- **Polos:**  $-0,009 \pm j 0,002$
- **Zeros:** 0,007

Essa localização indica que o sistema é estável, pois todos os polos estão localizados no semiplano esquerdo ( $Re(s) < 0$ ). Portanto a representação do LGR do sistema se comporta da seguinte forma.



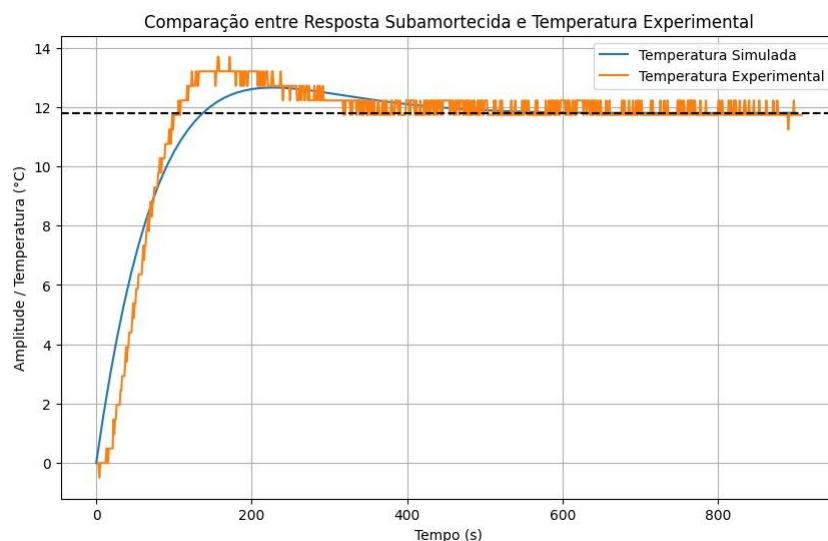
Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I  
Figura 17 -LGR Experimento III



Fonte: Autoral.

O LGR demonstra que o presente sistema é um sistema subamortecido diante da posição dos polos. Para verificar a eficiência do controlador na prática, comparou-se a resposta experimental a simulada apresentada abaixo.

Figura 18 - Comparação entre resposta subamortecida Simulada x Experimental.



Fonte: Autoral.

O resultado experimental se assemelha muito ao simulado, mostrando total eficácia do sistema do controlador.



Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Sistemas de Controle I

## 7. CONCLUSÃO

Este projeto no Laboratório de Controle de Temperatura Portátil permitiu uma análise prática e aprofundada dos conceitos de controle de sistemas, aplicados anteriormente apenas em teoria. Com a realização deste trabalho, foi possível observar diretamente como o sistema reage a um sinal degrau, extraindo parâmetros críticos como o ganho  $K$  e a constante de tempo, que até então haviam sido apenas discutidos teoricamente. Essas observações permitiram a construção e ajuste de um modelo para estabilizar o sistema, levando ao desenvolvimento e implementação de um controlador Proporcional-Integral (PI). A modelagem do controlador PI permitiu calcular os valores ideais de ganho e testar diferentes respostas do sistema, revelando características como respostas superamortecida e subamortecidas.

A experimentação prática realizada consolidou o conhecimento adquirido em Sistemas de Controle I de maneira direta, permitindo ver na prática a resposta do sistema ao controle PI e as adaptações necessárias para se obter um desempenho mais estável e preciso. As respostas obtidas ficaram dentro dos limites esperados, proporcionando uma visão clara do comportamento do sistema diante de um sinal degrau e de respostas subamortecidas. Essas análises demonstraram a necessidade de aprimoramento na modelagem futura, com o objetivo de obter uma resposta consistente e que atenda aos requisitos do sistema de forma satisfatória.

Ao final, foram observadas três configurações de resposta ideais: enquanto a simulação apresentou valores teoricamente adequados, o teste real no LCTP evidenciou variações práticas. Dentre os resultados, três respostas finais apresentaram-se como as mais consistentes, com duas sendo subamortecidas e uma superamortecida, representando um desempenho estável e ajustado do controlador PI, validando o conhecimento e a prática integrados neste projeto.

## 8. REFERÊNCIAS

**N. S. Nise, *Engenharia de Sistemas de Controle*, 6ª ed. São Paulo, Brasil: LTC, 2012.**